

索结构 典型工程集

(上册)

张毅刚 主编

秦杰 郭正兴 副主编

徐瑞龙 王德勤

中国建筑工业出版社

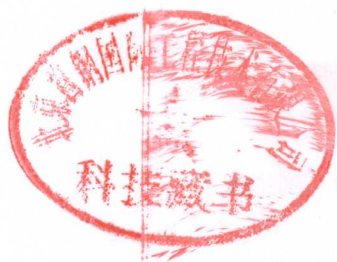
TU351

2014035

索结构典型工程集

(上册)

张毅刚 主 编
秦 杰 郭正兴 副主编
徐瑞龙 王德勤



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

索结构典型工程集 (上册) /张毅刚主编. —北京: 中国
建筑工业出版社, 2013. 11
ISBN 978-7-112-15922-2

I. ①索… II. ①张… III. ①悬索结构—建筑工程—中
国 IV. ①TU351

中国版本图书馆CIP数据核字 (2013) 第229143号

责任编辑: 刘瑞霞 辛海丽

责任设计: 董建平

责任校对: 张颖 关健

索结构典型工程集

(上册)

张毅刚 主编

秦杰 郭正兴 徐瑞龙 王德勤 副主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京京点设计公司制版

北京画中画印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 16½ 字数: 410千字

2013年11月第一版 2013年11月第一次印刷

定价: 148.00元

ISBN 978-7-112-15922-2

(24673)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

编委会

主 编 张毅刚 (北京工业大学)

副主编 秦 杰 (北京建工集团有限责任公司)

郭正兴 (东南大学)

徐瑞龙 (北京市建筑工程研究院有限责任公司)

王德勤 (北京德宏幕墙工程技术研究中心)

编 委 (按姓氏笔画排序)

王元清 (清华大学)

王双军 (沈阳远大铝业工程有限公司)

王秀丽 (兰州理工大学)

亢国雷 (巨力索具股份有限公司)

朱万旭 (欧维姆机械股份有限公司)

刘 枫 (中国建筑科学研究院)

刘 健 (中国建筑科学研究院深圳分院)

孙 坚 (深圳三鑫幕墙工程有限公司)

李亚明 (上海建筑设计研究院有限公司)

李海旺 (太原理工大学)

吴金志 (北京工业大学)

吴耀华 (中冶建筑研究总院有限公司设计院)

何志军 (同济大学建筑设计研究院)

陈志华 (天津大学)

罗 斌 (东南大学)

罗永峰 (同济大学)

罗尧治 (浙江大学)

周 岱 (上海交通大学)

赵 波 (坚朗五金制品有限公司)

袁行飞 (浙江大学)

钱英欣 (北京市建筑工程研究院有限责任公司)

黄拥军 (北京江河幕墙股份有限公司)

曹正罡 (哈尔滨工业大学建筑设计研究院)

梁存之 (建研(北京)结构工程有限公司)

序

中国现代悬索结构的发展始于 20 世纪 50 年代后期,北京工人体育馆的圆形辐式双层索系(直径 96m)和杭州浙江人民体育馆的双曲抛物面索网(80m×60m 椭圆平面)是当时的两个代表作。大家知道,世界上第一个现代悬索结构是美国于 1953 年建成的 Raleigh 体育馆,采用以两个斜放的抛物线拱为边缘的鞍形索网(平面尺度 91.5m×91.5m)。我国建造的上述两个悬索结构无论是从规模大小或技术水平来看,在当时都可以说是达到国际较先进水平的。但此后,我国悬索结构发展停顿了较长一段时期,一直到 20 世纪 80 年代初期,在改革开放的大局面下,蓬勃兴起的生产建设形势对包括悬索结构在内的各种新颖空间结构体系的发展起到了良好的刺激作用。单层悬索、双层索系、索网结构、索-梁体系、索拱体系、斜拉体系等各种悬索结构形式都得到了不同程度的研究、开发和工程应用,反映了我国科技人员对结构创新的热情和建设科技水平的提高。

我本人也是在那个时期加入到空间结构的研究行列中来的,而且参与的第一个工程就是悬索结构。1982 年建筑系的梅季魁教授承接了吉林滑冰馆的设计任务,找我配合做结构,希望在结构形式上有所创新。我们结合建筑方案特点决定采用一种新的预应力双层悬索系统,希望以此来促进悬索结构在我国的发展。我当时对悬索结构也不熟悉,硬着头皮对有关文献钻研了几个月,推导了预应力双层索系的全套解析理论,总算把这一设计任务顶了下来。以此为契机,三十年来与空间结构结下了不解之缘,但始终对悬索结构情有独钟。

悬索结构在 20 世纪 90 年代曾有一段时期的沉寂,我把它理解为我国新兴的索结构行业在成长过程中的休整并进一步积蓄力量的过程。果然,从 20 世纪末开始,随着我国经济的快速发展,悬索结构重新活跃起来,并且呈现出许多新的特点。例如,相对于传统的采用刚性屋面的悬索屋盖,由索和膜两种材料联合运用而形成的柔性张力结构,即所谓的索膜结构取得了快速发展;将索与刚性构件联合运用形成的轻型混合体系,例如各种张弦结构,在大跨度屋盖中获得了广泛应用;以各种形式索系为承重结构的玻璃幕墙和采光屋顶是近年来悬索结构广泛应用的一个新领域。这些特点说明,我国的悬索结构进入了一个欣欣向荣、丰富多彩的发展阶段。

2010年中国钢结构协会空间结构分会成立了张毅刚教授为主任的索结构专业委员会，聚集了国内热心索结构研究与工程应用的学者和工程技术人员。他们选择了亲身参与的近十年来100个索结构典型工程，包括了十类索结构体系，对它们的设计、构造和施工技术进行了详细介绍，汇集成这本书，做了一件非常有意义的事。这本书既是十年来我国索结构发展历程的记录，也充分反映了我国工程科技人员在索结构体系创新方面的探索。值得指出的是，由于不少施工企业的工程人员参与了本书的编写，书中充分关注了索结构的建造技术，包括预应力张拉控制、施工过程数值模拟和施工检测等方面的介绍。这也是十年来索结构技术发展中进步最快的方面，有了这方面经验的积累，我国索结构的发展必将更加迅速。实际上，我国十余年来索结构的健康快速发展也充分反映了企业逐渐成为科技创新的主体这一事实。

这类以工程案例为主的书还不多，相信这本书的出版，将为索结构的设计与施工单位提供非常宝贵的参考资料，为我国索结构的进一步发展作出贡献。爰为之序，与同仁们共勉。

张毅刚

于哈尔滨工业大学

2013年10月10日

前言

索作为主要承重构件应用于建筑结构始于 20 世纪 50 年代，从诞生之日起，索结构就以其轻盈的体态、合理的受力与优美的造型吸引了建筑师与结构工程师们的关注，迅速发展成为建筑结构大家族中的一个分支。六十多年来，索结构的发展更是日新月异。从早年以索悬吊为主的单索发展到索网、索桁架、索穹顶，再到将柔性的索与刚性结构相结合创新出斜拉结构、张弦结构、拉索拱结构、弦支穹顶等各种索结构体系，充分展示了人类的聪明才智。

我国关于索结构的研究与工程实践与国际上索结构发展基本同步，一些 20 世纪 60 年代建成的著名工程，如北京工人体育馆悬索结构，至今仍然为人们津津乐道。20 世纪 80 年代末为承接北京亚运会建成的国家奥林匹克中心综合馆、游泳馆斜拉结构、北京朝阳体育馆索拱结构、吉林滑冰馆索桁架等工程充分展示了当年我国索结构的建造水平。尽管索结构的工程应用后来有过一段时间的沉寂，但是我国建筑科研人员与工程技术人员关于索结构的分析理论、建造技术以及索具制作的研究一直奋斗不止、厚积待发。

20 世纪末我国经济进入快速发展的轨道，大跨度大空间建筑需求日益增加，建筑功能和类型多样化要求日益强烈，索结构再次引起人们的关注。以 1999 年 9 月采用张弦结构的上海浦东国际机场（一期）航站楼竣工投入运营为标志，索结构的应用进入迅速发展的新阶段。尤其近十年来，各种类型的索结构已经发展成为大跨度大空间建筑的主角。

随着索结构的应用，人们越来越认识到预应力的施加及施工过程的仿真模拟是一个索结构工程能否成功建造的关键。然而关于索结构工程的报道散见在各种论文、刊物中，而且关于分析理论报道居多，关于施工技术的报道显得不足。我们这些从事索结构研究与施工的学者与工程技术人员一直希望能够结合自己的体会，把亲手参与建成的那些索结构工程的特点、具体建造技术、施工模拟及监测技术系统地进行总结，并详尽地介绍给同行。

为此，我们在直接参与施工或咨询的工程中，挑选了近十年建成的、具有不同特点的 100 个工程，以图文并茂的方式写成这本典型工程集，展

现给读者。每个工程包括：概况、设计特点、施工特点和工程图片，并选择其中部分工程介绍施工模拟分析和施工过程监测。本书希望成为一部纪录片，向读者忠实展现近十年索结构建造技术的发展历程，留下宝贵的资料与读者交流。同时，也希望夯实索结构发展基础，以期推动索结构发展百尺竿头、更进一步。

全书涵盖十种类型索结构工程，分为上下两册，上册包括：单向张弦结构、双向张弦结构、空间张弦结构、弦支穹顶结构和管内索结构共五章；下册包括：悬索结构、索穹顶结构、拉索拱结构、斜拉结构和幕墙索结构共五章。每章分类型按照工程主体结构完成时间的先后顺序编排，从中也能看出各类索结构建造技术的发展。

本书编委会由中国钢结构协会空间结构分会索结构委员会全体委员和参与组织资料并编写的有关人员组成。编委会集体讨论了编写大纲，具体由参与索结构工程施工或咨询的编委会成员组织并撰写，尽可能列出工程的设计、总包、钢结构和索结构施工、索具生产等单位，全书由张毅刚、秦杰进行统稿。限于掌握的资料有限，肯定还有优秀的索结构工程没能包括在内，敬请同行们谅解。

由于编撰时间相对仓促，加之水平有限，疏漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。值此书稿完成之际，还要由衷地感谢巨力索具股份有限公司为本书出版提供的大力支持。

谨以此书祝贺中国钢结构协会空间结构分会成立二十周年，与热心我国索结构发展的同行们共勉。

编委会

2013年9月

目 录

上 册

第 1 章 单向张弦结构	1
1.1 引言	1
1.1.1 张弦结构的概念	1
1.1.2 单向张弦结构的特点	2
1.2 单上弦张弦梁	4
1.2.1 南京会议展览中心	4
1.2.2 厦门会展中心	9
1.2.3 上海虹桥国际机场二期	15
1.3 双上弦张弦梁	19
1.3.1 北京农业生态中心	19
1.3.2 北京金融街 F7/9 大厦活力中心	23
1.3.3 延安火车站站台雨篷	27
1.3.4 福州南站站台雨篷	31
1.3.5 广州南站	35
1.3.6 济宁市游泳跳水馆	40
1.4 单向张弦桁架	46
1.4.1 哈尔滨国际会展体育中心	46
1.4.2 全国农业展览馆中西广场展厅	49
1.4.3 北京北站站台雨篷	53
1.4.4 上海世博会主题馆	57
1.4.5 镇江体育会展馆	61
1.4.6 绍兴体育会展馆	66
1.4.7 鄱阳湖模型试验研究基地模型试验大厅	70
1.5 单向张弦网架 (壳)	77
1.5.1 青岛国际帆船中心媒体中心	77
1.5.2 东营黄河口模型试验厅	81

1.5.3	山西体育中心三馆.....	85
第 2 章	双向张弦结构	91
2.1	引言.....	91
2.2	北京中石油大厦.....	93
2.3	国家体育馆.....	97
2.4	深圳市福田交通综合枢纽换乘中心	108
2.5	最高人民法院人民来访接待站.....	115
第 3 章	空间张弦结构	119
3.1	引言.....	119
3.2	北京大学乒乓球馆.....	121
3.3	龙口金海湾会议中心.....	124
3.4	南沙体育馆.....	129
3.5	额济纳体育运动及文化艺术中心.....	134
3.6	九龙湖体育馆.....	138
3.7	乐清市体育中心体育馆和游泳馆.....	143
第 4 章	弦支穹顶结构	147
4.1	引言.....	147
4.1.1	基本概念.....	147
4.1.2	受力机理.....	148
4.2	武汉体育中心体育馆.....	150
4.3	北京工业大学体育馆主馆.....	156
4.4	常州市体育馆.....	161
4.5	安徽大学新校区体育馆.....	168
4.6	渝北体育馆.....	173
4.7	济南奥林匹克体育中心体育馆.....	177

4.8	茌平体育馆.....	181
4.9	三亚体育中心体育馆.....	185
4.10	连云港体育馆.....	191
4.11	常熟市体育中心二期体育馆.....	195
4.12	大连体育中心体育馆.....	198
4.13	营口奥体中心体育馆.....	205
4.14	葫芦岛体育中心体育馆.....	209
4.15	徐州奥体中心体育场.....	215
第 5 章	管内索结构.....	220
5.1	引言.....	220
5.2	蚌埠龙湖体育馆.....	222
5.3	新中国国际展览中心.....	225
5.4	东北师范大学体育馆.....	229
5.5	广州珠江新城西塔.....	234
5.6	广州市花都体育馆.....	239
5.7	广东省博物馆新馆.....	244
5.8	天津水运所海港、内河实验厅.....	249

第 1 章 单向张弦结构

1.1 引言

1.1.1 张弦结构的概念

1958 年在山西大同煤矿四老沟矿建成了我国第一个预应力钢结构输煤栈桥（图 1.1.1），跨度 25m，上弦是平面桁架，下弦采用了预应力钢筋，其间用两根撑杆连接。该结构中上弦桁架和下弦抗拉构件协同工作，提高了结构刚度，成为受力合理的自平衡体系，比直接采用钢桁架节省钢材达 51%。1959 年在太原钢厂焦化厂建成了第二个同样结构体系的输煤栈桥，跨度 53m。类似结构以后陆续有些应用。如 1960 年在太原钢厂钢坯库建成了跨度 12m 的预应力钢吊车梁，下弦采用了高强钢丝。1982 年在宁夏石咀山市大武口电厂成功地建成跨度达 60m 的输煤栈桥，下弦采用了钢绞线，图 1.1.2 为该工程的试验模型。

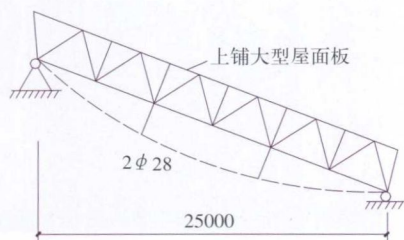


图 1.1.1 四老沟矿预应力钢结构输煤栈桥

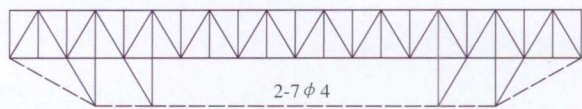


图 1.1.2 大武口电厂预应力输煤栈桥试验模型

这种类型的结构在欧洲、日本也很早就有应用，由于最初上弦是采用钢梁，英文称为 Beam String Structure。1986 年日本大学 Masao Saitoh 教授将这种结构定义为：“用撑杆连接压弯构件和抗拉构件而形成的自平衡体系”，基于“将弦进行张拉，与梁组合”这一基本形式，称其为张弦梁。

近年来，张弦梁的应用日益广泛，上弦形式从梁发展到拱、桁架、立体桁架、网壳等多种结构形式。显然用“张弦梁”这个名称已经无法涵盖。由 M. Saitoh 教授的定义到以后的众多工程实践，可以认为“张弦”已经发展成为一种结构概念，基于这个概念已经形成了一类结构体系，即张弦结构。可根据上弦刚性结构的特点分别称为张弦梁、张弦桁架等。

张弦结构的组成有以下特点：

- ①由上弦刚性构件（或结构）与下弦柔性索结合成的一种预应力钢结构；
- ②撑杆是结构中必要构件，上弦与下弦之间通过受压撑杆连接；
- ③刚性构件（或结构）与柔性索必须要合理组合形成自平衡体系。

1999 年 9 月 16 日上海浦东国际机场（一期工程）航站楼竣工投入运营，进厅、办票厅、商场和登机廊四个大空间屋盖均采用了张弦梁，其支点水平投影跨度依次为 49.3m、82.6m、44.4m 和 54.3m（图 1.1.3）。这是首次将该体系用于大跨度的屋盖，它的成功引起了人们广泛的关注，推动了张弦梁的发展。2002 年建成的广州国际会展中心张弦立体桁架结构跨度达 126.6m（图 1.1.4）。

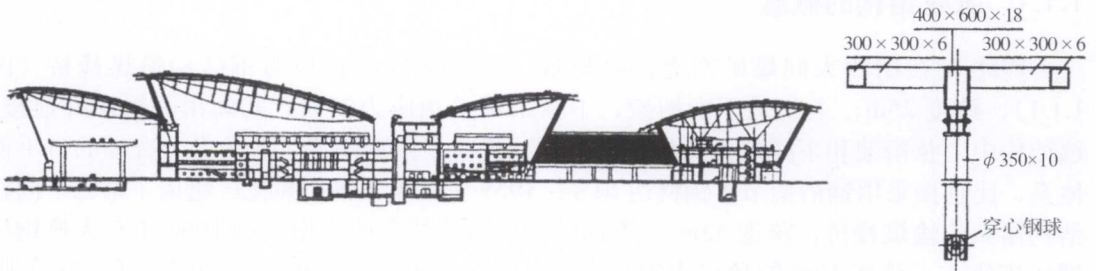


图 1.1.3 上海浦东国际机场（一期工程）航站楼张弦梁



图 1.1.4 广州国际会展中心张弦立体桁架

1.1.2 单向张弦结构的特点

张弦结构中索撑体系单向布置称为单向张弦结构，其基本形式见图 1.1.5。上弦构件（结构）可以是平直的，也可以是拱形的；撑杆为刚性直杆；下弦索也可以采用钢拉杆，一般构造成一定的垂度。应用时通常将数榀单向张弦结构平行布置，榀间辅以纵向连接构件和必要的支撑体系，以保证单向张弦结构平面外的稳定性。也可以采用双上弦构造、立体桁架上弦或者网架（壳）上弦以提高平面外稳定性，本章后续将逐一介绍。由于单向张弦结构形式多样，设计与施工易于把握，适用范围广，近年来的应用最为活跃。

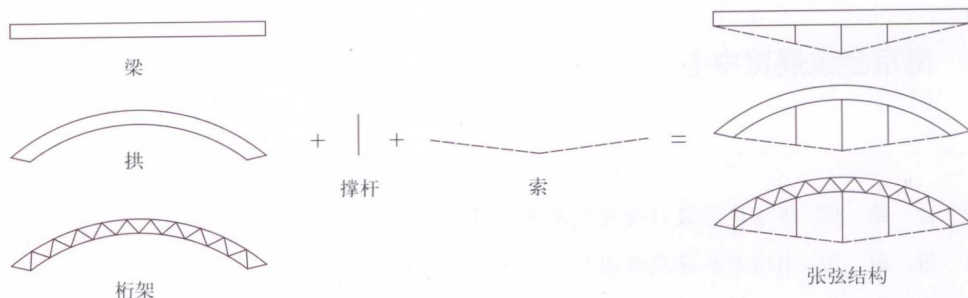


图 1.1.5 单向张弦结构的基本形式

单向张弦结构的受力机理可以通过图 1.1.6 (a) 所示张弦梁来说明。在均布荷载作用下，相应的简支梁跨中最大弯矩为 $1/8ql^2$ ，见图 1.1.6 (b)；在索内施加预应力后，通过支座和撑杆，梁内引起负弯矩。当跨中负弯矩也达到图 1.1.6 (c) 所示的 $1/8ql^2$ 时，张弦梁的最大弯矩只有相应简支梁最大弯矩的 $1/4$ ，如图 1.1.6 (d) 所示。可以认为索撑体系给上弦梁提供了跨中弹性支撑，梁上各个截面的弯矩大小和分布得以调整，受力趋于均匀。同样的道理结构变形也大为减小，刚度得以提高。而且上弦梁内产生压力与下弦索拉力的水平分量平衡，形成自平衡体系，当上弦为拱形时，索的引入可以平衡支座端的水平推力。显然，张弦结构组合了刚性和柔性两类材料以后，受力性能更合理，结构更为经济。

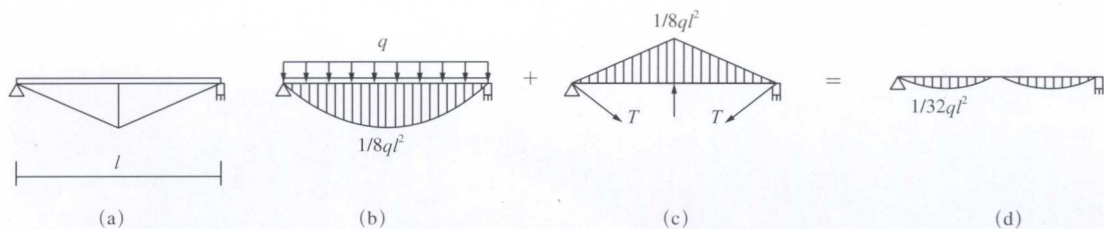


图 1.1.6 单向张弦结构的受力机理

单向张弦结构分析计算时应考虑几何非线性影响，并要做好预应力施加各阶段的模拟分析，保证达到设计预应力后，各撑杆平行且处于设计的角度。施加预应力的方法也不限于张拉下弦索，还可采取伸长撑杆，调整支座等。风荷载的吸力有使下弦索松弛的趋势，有的工程中采取在上弦钢管中注入砂石以增加自重的做法。撑杆和上部压弯构件的连接可考虑铰接，只传递轴力，此时撑杆为二力杆；也可考虑刚接，撑杆需传递弯矩。索和撑杆的连接多设计成索夹，施工完成后用螺栓连接，同时将索卡紧。索的锚固端节点连接索和压弯构件，多采用穿心节点，将索穿过上弦压弯构件后锚固。

1.2 单上弦张弦梁

1.2.1 南京会议展览中心

设计单位: 华东建筑设计研究院有限公司

总包单位: 南通新华建筑集团有限公司

钢结构安装单位: 上海宝冶建设集团有限公司、长江精工钢结构(集团)有限责任公司

索结构施工单位: 国家预应力工程技术研究中心·南京东大现代预应力工程有限责任公司

索具类型: 巨力索具·外包PE镀锌钢丝绳

主体完工时间: 2007年

1. 概况

南京会议展览中心坐落于南京市河西中央区, 现名南京国际博览中心, 拥有展览和会议两大功能, 分为展馆、会议中心和配套服务设施三个部分, 气势磅礴, 规模宏大(图 1.2.1)。

会展中心采用平面展开和大空间的设计, 6大展馆都只有一层, 每座展馆的展览面积为 12000m^2 , 长 162m , 宽 72m , 净高 $14\sim 22\text{m}$ 。展览大厅屋面主体结构为张弦梁, 整个屋盖支承于下部钢管混凝土柱上。

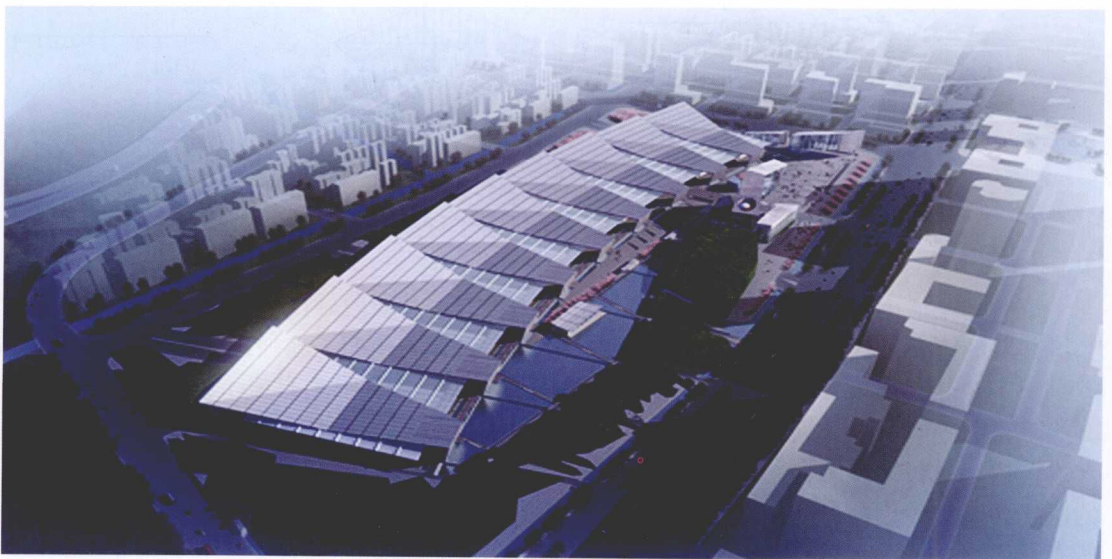


图 1.2.1 南京会议展览中心

2. 设计特点

单个展厅的钢屋盖结构共有 18 榀张弦梁,单榀张弦梁自重约 83t,间距 9m,跨度 74m(图 1.2.2)。屋盖纵向中部第 9 榀张弦梁处存在高差和端部悬挑,采用加强桁架的方式过渡处理。张弦梁的上弦是由两根工字型钢加连接横板拼接而成的直梁,高 1.2m(图 1.2.3);下弦为 PES C7×301 预应力钢索,钢丝为 1670 级镀锌钢丝,索头采用冷铸锚。主要构件截面列于表 1.2.1。

主要构件截面

表 1.2.1

上弦工字梁	桁架方钢管	联系工字梁	撑杆	拉索
H 1200×600×24×35 H 1200×600×20×30	□600×600×20×20	H 600×300×14×8	φ 325×8	φ 7×301

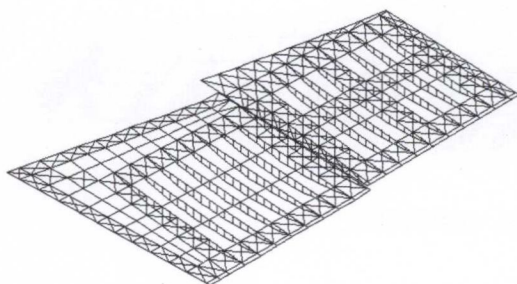


图 1.2.2 钢结构轴测图

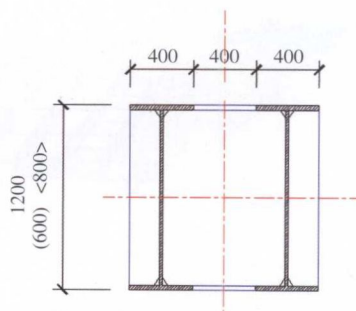


图 1.2.3 上弦梁截面示意图

由于建筑大空间的要求,下弦索的垂度只有 4m,撑杆长度统一接长至 4.2m,使展厅内部结构在视觉上极具韵律性(图 1.2.4)。屋盖角部大悬挑部位设置斜撑杆,结构杆件布置和节点造型轻盈美观,建筑艺术效果强烈(图 1.2.5)。

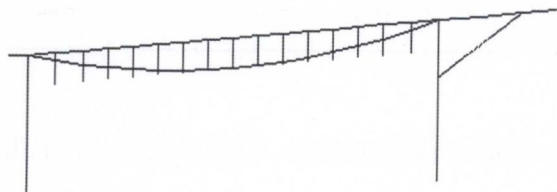


图 1.2.4 单榀张弦梁结构单元



图 1.2.5 角部大悬挑

3. 施工特点

总体安装顺序如下:首先逐榀安装上弦钢结构;再进行拉索张拉,张拉滞后于安装两榀,拉索一次性张拉到位;最后进行两侧悬挑部分的拼装。

1) 钢结构安装

该工程的钢结构安装由上海宝冶建设集团有限公司和长江精工钢结构(集团)有限责任公司共同完成。前者采用将张弦梁分为三段,吊装至支撑胎架上拼装,先高空拼装完成两榀张弦梁单元,后逐榀扩大吊装的安装方案;后者采用整榀提升的安装方案,最先以两榀张弦梁为第一个提升单元,其后以一榀张弦梁为提升单元扩大,进行提升安装。

2) 初始预张力找力分析

以张弦梁在结构自重初始态下的跨中竖向位移为零作为目标,对下弦索的预张力进行找力分析;从而得到各榀张弦梁的张拉索力。分析结果列于表 1.2.2。

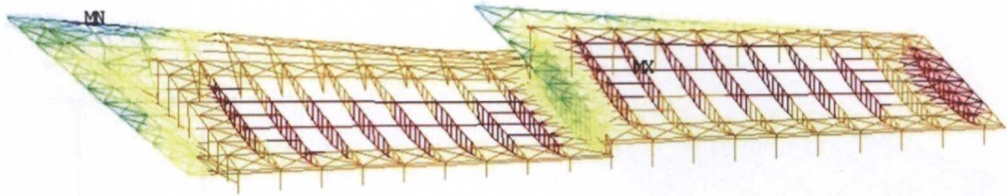


图 1.2.6 索力分析云图

由表 1.2.2 可知,各榀张弦梁的张拉索力普遍介于 2000~3500 kN 之间,仅第 11 轴所需张拉索力达到 5500kN,明显过大。故将 11 轴张弦梁(加强桁架)预先起拱 20mm,调整找力分析,并最终确定 11 轴张拉索力为 2080 kN。

初始预张力分析结果

表 1.2.2

轴线编号	3	4	5	6	7	8	9	10	11
索力 (kN)	2480	2270	2180	2190	2200	2200	2210	3490	5500
轴线编号	12	13	14	15	16	17	18	19	20
索力 (kN)	3410	2220	2260	2410	2420	2310	2310	2430	3030

3) 张拉下弦索

张拉顺序为从 20 轴至 3 轴逐榀张拉,其中端部两榀同时张拉,其他轴每安装一榀张拉一榀,即滞后两榀张拉(图 1.2.7)。

该工程张弦梁上弦是平直的,撑杆的顶部均铰接在上弦钢梁截面的形心线以下,索有很强的向外侧偏摆的趋势。因此,通过对撑杆上端的叉耳进行精加工,以减小叉耳与耳板之间的活动间隙,从而保证撑杆上端平面外的有效约束(图 1.2.8)。